آنالیز لرزه‌ای منارهای تاریخی آجری ایرانی★

مهرداد حجازی[۱] سید محمد مویدیان[۲] مریم داعی[۳]

چکیده *با توجه به ارتفاع زیاد منارها و مقاومت کششی ضعیف مصالح بنایی آجری، بررسی رفتار سازه‌ای آنها در برابر زلزله‌های آینده حائز اهمیت می‌باشد. بدین منظور در این مقاله نه منار تاریخی شهر اصفهان در دو حالت به‌صورت کامل و فقط پوسته‌ی خارجی، با استفاده از روش المان محدود غیرخطی مدل‌سازی شده اند. نتایج حاصل از آنالیزهای تاریخچه زمانی غیرخطی دلالت بر این دارند که منارها تحت شتاب‌نگاشت‌های انتخاب‌شده بر مبنای ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ در مراحل ابتدایی دچار شکست از نوع ترک‌های کششی مورب در آجر و خردشدگی در مصالح می‌شوند. لذا در ادامه تأثیر چهار پارامتر شامل ارتفاع، مقاومت‌های کششی و فشاری مصالح، معیار شکست و میزان میرایی برای رسیدن به حالتی که منارها دچار شکست نشوند، بررسی شده است. تغییر متعارف در پارامترهای مذکور از شکست منارها جلوگیری در برابر زلزله نمی‌کند.*

واژه‌های کلیدی منار، مصالح بنایی آجری، تاریخی، ایران، زلزله، آنالیز تاریخچه زمانی، رفتار غیرخطی.

Seismic Analysis of Persian Historical Brick Masonry Minarets

M. Hejazi S.M. Moayedian M. Daei

Abstract *According to high height and weak tensile strength of materials in minarets, it is necessary to study the structural behaviour of minarets under earthquake loading. Therefore nine historical brick masonry minarets in Isfahan have been modelled and analysed by applying the nonlinear finite element method for two cases: 1) the whole minaret, and 2) only the outer shell. Results show that all minarets fail due to inclined tensile cracks in bricks and bearing of materials under scaled ground motion records based on the 2800 code. Parametric study has been done to find situations in which the minarets do not undergo failure. Parameters have been the height of minarets, tensile and compressive strengths of materials, failure criterion, and damping ratio. Conventional variation of the parameters does not prevent the failure of minarets due to earthquakes.*

Keywords Minaret, Brick Masonry Materials, Historical, Iran, Earthquake, Time History Analysis, Non-Linear Behaviour.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۲/۵/٦ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۳/۱۷ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسئول، دانشیار، گروه عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان.

(۲) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان.

(۳) استادیار، گروه عمران، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان.

مقدمه

معماری در همـه دوران‌هـا از تأثیرگـذارترین هنرهـای ایران بوده است. . بناها و عناصر معمـاری متعـددی در این جاودانگی ازلی و ماندگی این هنر دخیل بوده انـد. یکی از این عناصر که در هـر دو دوره پـیش و پـس از اسلام نقشی چشمگیر و حضوری کـم نظیـر بـه عهـده داشته منار است. ساخت منار در ایران پیشینه ۲گار۲۰۰ ساله دارد. با توجه به ویژگی‌های خاص مصالح بنـایی آجری به کار رفته دراین نوع سازه‌ها، از جمله مقاومت کم در مقابل تنش کششی و هم‌چنین با توجه به ارتفاع زیاد منارها این احتمال وجود دارد که بعضی از آنها در برابر زلزله های آینده دچار آسیب شوند، لذا بـا توجـه به اهمیت تاریخی، فرهنگی و معماری منارها، بررسـی رفتار سازه‌ای آنها لازم می باشد [۱].

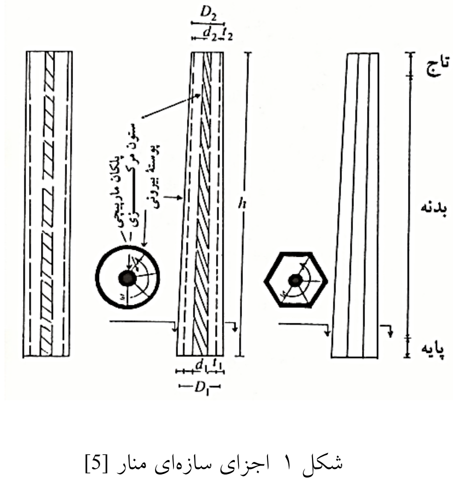
به‌طور کلی یک منار از سه قسمت پایه (یا سکو)، بدنه (یا ساقه) و کلاهک (یا تاج) تشکیل شـده اسـت. با توجـه بـه ارتفـاع زیـاد ومسـاحت کـم‌قاعـده، پایـه مهم‌ترین نقش را در مقاومت منار داشته کوچـک‌تـرین سسـتی در ایـن قسـمت یـا زمـین زیـر آن منجـر بـه فروریختن بنا می‌شود.

هر بدنه دارای بخش‌هـای دکـل (سـتون میـانی)، پلکـان و نـورگیر مـی‌باشـد. سـتون میـانی بـا مقطـع چندضلعی یا بـه شـکل اسـتوانه‌ای اسـت کـه پلکـان مارپیچی به دور آن می‌چرخد و بالا می‌رود. نورگیرهـا به صورت روزنه‌هایی کوچک به اندازه جای خالی یک یا چند آجر و یا به صورت پنجره‌هایی بزرگ که گاهی جهت اذان گویی نیز از آنهـا اسـتفاده مـی‌شـده اسـت، ساخته شده‌اند. اجزای سازه ای منار در شکل (۱) نشان داده شده است.

در تحقیقات انجام شده بر روی برج‌های تاریخی جهان می‌توان به دو مورد زیر اشاره کرد.

برج ناقوس «باتیز» در ایتالیا توسط «برناردسـکی» و همکارانش ابتدا تنها تحت وزن خود و سپس تحـت بار وزن و بار افقی بررسی گردیده اسـت. در واقـع در این مدل‌ها رفتـار لـرزه‌ای لحـاظ شـده اسـت. در ایـن پژوهش توزیع ترک‌ها به‌صورت عددی به‌دست آمده و نتایج، تطابق خوبی با توزیع ترک‌هـا در حالـت واقعـی داشته است [2]. آنالیز لرزه‌ای برج «آسینلی» در «بلوگنا» ایتالیا در سال ۱۹۹۸ توسط «ریوا» و همکـارانش انجـام شده‌است. در این پژوهش ارزیابی پایداری برج توسـط حالاتی مشابه اتفاقات لرزه‌ای به‌صورت آنالیز دینامیکی غیرخطی روی مدل مشـابه انجـام شـده اسـت [3]. در سال ۲۰۱۰ میلادی مدل عددی جهت ارزیـابی لـرزه‌ای منار «قطب» در ترکیه توسـط «پنـا» و «لورنسـو» انجـام گرفته است که در آن به مقایسـه‌ی نتـایج اسـتاتیکی و دینامیکی در برابر بارهای لرزه‌ای پرداختـه شـده اسـت [4].

در این مقاله برخی از مهم‌تـرین منارهـای آجـری تاریخی ایران تحت آنـالیز دینـامیکی تاریخچـه زمـانی غیرخطی از هفت شتاب نگاشت مناسب و مقیاس شده براساس ضوابط اسـتاندارد ۲۸۰۰ بـا اسـتفاده از روش المان محدود غیرخطی، در دو حالت منـار بـه‌صـورت کامل (شامل پوسته منـار، سـتون مرکـزی و راه پلـه) و فقط پوسته خارجی، مورد مطالعه قرار گرفته است.



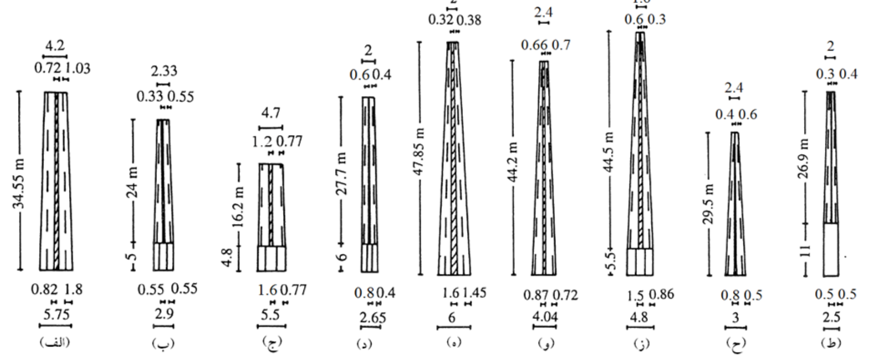
شکل ۱ اجزای سازه‌ای منار [5]

مشخصات منارهای مورد مطالعه و روش آنالیز

اوج هنر منارسازی در ایران بـه قـرون پـنجم و ششـم هجری باز می‌گردد که در آن زمان تعداد قابـل‌تـوجهی منار ساخته شد، و اصفهان از جمله شهرهایی است کـه در آن هنوز تعدادی از مهـم‌تـرین منارهـای ایـن دوره پابرجا هستند. از مهـم‌تـرین ایـن منارهـا مـی‌تـوان بـه منارهـای برسـیان، چهـل دختـران، گـار، سـین، علـی، ساربان، زیار، رهروان و باغ قوشخانه اشاره نمـود. ایـن منارها دارای ابعاد هندسی متفاوتی می‌باشند. در شـکل (۲) ابعاد منارهای مورد مطالعه (واقع در اصفهان) نشان داده شده است. ارتفاع از حدود ۲۰ m تا بیش از ۵۰ m تغییر می‌کند. قطر خارجی در پایه بین حدود ۲/۵ m تا ٦ m، و در بـالا بـین ۲ m تـا حـدود ۵ m مـی‌باشـد. ضخامت پوستهٔ بیرونی از ۰/٤ m تا ۱/۸ m در پایـه تـا ۰/٤ m تا ۱ m در بالا متغیر است و قطر ستون مرکـزی ۰/۳ m تا ۱/٦ m می‌باشد [5].

به‌منظور آنالیز این منارها از روش المان محـدود تاریخچه زمانی غیرخطی استفاده شده است. بـه‌کمـک آنالیز دینامیکی گذرا (که گاهی بـه آن آنـالیز تاریخچـه زمانی هم مـی‌گوینـد) مـی‌تـوان بـه محاسـبه‌ی پاسـخ دینامیکی یک سازه تحت تأثیر بارگـذاری‌هـای وابسـته به زمان پرداخت. در این آنالیز می‌تـوان بـه محاسـبه‌ی جابه‌جائی‌ها، کرنش‌ها و تنش‌هـا و نیروهـای متغیـر بـا زمان در یک سازه پرداخت. در آنالیز دینامیک گذرا سه روش برای نحوه‌ی انجام محاسبات ماتریسـی موجـود است که در انجـام ایـن پـژوهش از روش حـل کامـل استفاده شده است. در ایـن روش تمـامی خصوصـیات خطی و غیرخطی مادی هندسی و المـان‌هـای خطـی و غیرخطی قابل اعمال می‌باشد. مدول یانگ (یـا سـختی به هر شکل ممکن) و چگالی (یا جـرم بـه هـر شـکل ممکن) حداقل خصوصیات ماده‌ای اسـت کـه بایسـتی تعیین شوند. هم‌چنین پـارامتر انتگرالـی گـذرا ماهیـت روش انتگرال زمانی نیومـارک (روش حـل ضـمنی) را کنترل می‌کند.

برای انجام محاسبات از نرم‌افزار ANSYS [6] و المان solid65 استفاده شده اسـت. ایـن المـان معمـولاً برای تحلیل ترک‌خوردگی در کشش و یا له‌شـدگی در فشار به‌کار می‌رود. این المان دارای هشت گره می‌باشد که در هـر گـره سـه درجـه آزادی وجـود دارد. تغییـر مکان‌ها در جهت‌هـای X و Y و Z سیسـتم مختصـات گره‌ها هستند. به‌عنوان مثال این المان برای مـدل‌سـازی بتن تقویت شده و یا مـواد مرکـب تقویـت شـده مثـل فایبرگلاس استفاده می‌شود. به‌منظور بررسی تأثیر ستون مرکزی و راه‌پله‌ی مارپیچ درون منارها بر رفتار سازه‌ای آنها، آنالیزها در دو حالت ۱) منـار بـه صـورت کامـل (شامل پوسته‌ی منـار، سـتون مرکـزی و راه پلـه) و ۲) فقط پوسته‌ی خارجی انجام گرفته‌اند.



شکل ۲ مشخصات ابعادی منارهای مورد مطالعه: (الف) برسیان، ٤۹۱ هجری قمری ؛ (ب) چهل دختران، ۵۰۱ هجری قمری ؛ (ج) گار، ۵۰۵ هجری قمری ؛ (د) سین، ۵۲٦ هجری قمری ؛ (ه) علی، قرن پنجم تا ششم هجری قمری ؛ (و) ساربان، ۵٤۹ هجری قمری ؛ (ز) زیار، قرن پنجم تا ششم هجری قمری ؛ (ح) رهروان، قرن پنجم تا ششم هجری قمری ؛ (ط) باغ قوشخانه، قرن هشتم هجری قمری [5]

برای بررسی میزان آسیب‌پذیری نه منار یادشده پس از مدل‌سازی، تحت بارهای ثقلی و زلزله مورد مطالعه قرار می‌گیرند. بدین منظور هفت شتاب‌نگاشت متناسب با شرایط حرکت واقعی زمین در محل احداث منارها انتخاب می‌شوند و با توجه به ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ به منارها نسبت داده و سپس آنالیز تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی انجام می‌شود.

مدل‌سازی رفتار مصالح بنایی به‌کار رفته در منارها

خصوصیات مکانیکی مصالح مورد استفاده که در تحقیقات پیشین [7] به‌دست آمده‌اند، در جدول (۱) نشان داده شده‌اند. با استفاده از نتایج تجربی حاصل شده در مطالعات قبلی [8] می‌توان رابطه‌ی تنش-کرنش برای ترکیب آجر و ملات را به‌صورت یک نمودار خطی- سهمی براساس روابط (۱) و (۲) بیان نمود.

$$\sigma = E\varepsilon_e \ , \ \varepsilon \le \varepsilon_e \qquad (۱)$$

$$\begin{aligned} &\sigma = (f_k/4)[7(\varepsilon/\varepsilon_e) - 2(\varepsilon/\varepsilon_e)^2 - 2] \\ &\varepsilon_e \le \varepsilon \le 2\varepsilon_e \\ &\varepsilon_e = 0.75 f_k / E \end{aligned} \qquad (۲)$$

که در آن f_k مقاومت فشاری و E مدول الاستیسیته‌ی مصالح ترکیبی آجر و ملات می‌باشند.

برای مصالح موجود در منارهای مورد مطالعه، با قراردادن مقادیر جدول (۱) در روابط (۱) و (۲)، رابطه‌ی تنش-کرنش به‌صورت روابط (۳) و (٤) در می‌آید که در شکل (۳) نشان داده شده است.

در همه‌ی آنالیزها از معیار شکست ویلام-وارنک [9] که مخصوص مصالح ترد و شکننده می‌باشد استفاده شده است. پارامترهای این معیار شکست برای ترکیب مصالح آجر و ملات برای استفاده در نرم‌افزار ANSYS براساس روابط (۵) تا (۱۱) محاسبه و در جدول (۲) نشان داده شده‌اند.

$$\varepsilon_e = 0.75 f_k / E = 0.75 \times 2.73 / 2370 = 7.5 \times 10^{-4} \qquad (۳)$$

$$\begin{aligned} &\sigma = (f_k/4)[7(\varepsilon/\varepsilon_e) - 2(\varepsilon/\varepsilon_e)^2 - 2] \\ &\sigma = (2.73/4)[7(\varepsilon/7.5\times10^{-4}) - \\ &\quad 2(\varepsilon/7.5\times10^{-4})^2 - 2] \\ &7.5\times10^{-4} \le \varepsilon \le 15\times10^{-4} \end{aligned} \qquad (٤)$$

$$f_{cb} = 1.2 f_c = 1.2 \times 2.73 = 3.276 \ \text{MPa} \qquad (۵)$$

$$f_1 = 1.45 f_c = 1.45 \times 2.73 = 3.96 \ \text{MPa} \qquad (٦)$$

$$f_2 = 1.725 f_c = 1.725 \times 2.73 = 4.71 \ \text{MPa} \qquad (۷)$$

$$\left|\sigma_h^a\right| \le 3^{1/2} f_c = 4.73 \ \text{MPa} \qquad (۸)$$

TFC = ضریب افزایش سختی ترک در کشش ,$f_1 = 1$

$$TFC = 0.6 \qquad , f_1 \ne 1 \qquad (۹)$$

$$\beta_t = 0.15^{[8]} \qquad (۱۰)$$

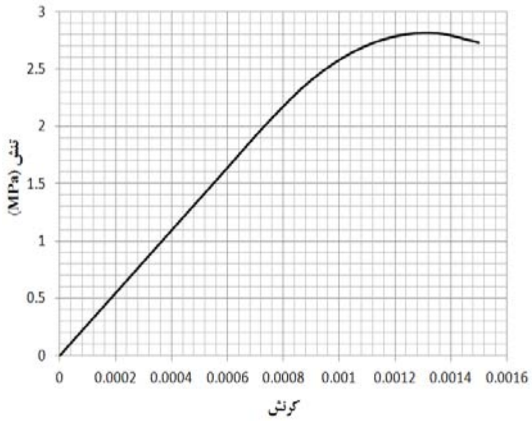
$$\beta_C = 0.75^{[9]} \qquad (۱۱)$$

که f_t، f_c، f_{cb}، f_1، f_2 و $\left|\sigma_h^a\right|$ به‌ترتیب مقاومت کششی تک‌محوری، مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت فشاری دومحوری، مقاومت فشاری برای حالتی از فشار دومحوری که بر روی تنش هیدرواستاتیک قرار داده می‌شود، مقاومت فشاری برای حالتی از فشار تک‌محوری که بر روی تنش هیدرواستاتیک قرار داده می‌شود و تنش هیدرواستاتیک می‌باشند. در برخی از آنالیزها به‌منظور کنترل نتایج از معیار شکست دراکر – پراگر [11] نیز استفاده شده است. در این معیار شکست که مدت زمان زیادی است که برای مصالح بنایی مورد استفاده قرار می‌گیرد رفتار مصالح الاستیک – پلاستیک و بدون سخت‌شوندگی در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس زاویه‌ی اصطکاک داخلی مصالح $\Phi = 38^\circ$ و ضریب چسبندگی $C = 0.1$ MPa به برنامه نسبت داده می‌شود [8-10].

برای پیش‌بینی شکست منارها معیارهای شکست اشاره شده، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در صورتی که معیار شکست برآورده نشود، این بدین معنی خواهد بود که ترکیب تنش‌های ایجاد شده باعث شکست منار خواهد شد.

جدول ۱ خصوصیات مکانیکی مصالح تشکیل‌دهنده‌ی منارها [7]

خصوصیات مکانیکی	آجر	ملات	ترکیب آجر و ملات
جرم حجمی (kg/m^3)	۱۳۳۰	۱۶۰۰	۱۵۳۰
مدول الاستیسیته (MPa)	۵۳۰۰	۱۳۰۰	۲۷۳۰
ضریب پواسون	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷
مقاومت کششی (MPa)	۰/۵۳	۰/۲۵	۰/۲۷
مقاومت فشاری (MPa)	۵/۳	۱	۲/۷۳
ضریب انبساط حرارتی (m/m/°C)	۰/۶ x ۱۰-۵	۰/۶x ۱۰-۵	۰/۶x ۱۰-۵



شکل ۳ نمودار تنش-کرنش ترکیب آجر و ملات منارها

جدول ۲ پارامترهای معیار شکست ویلام-وارنک برای ترکیب مصالح آجر و ملات برای استفاده در نرم‌افزار ANSYS

βt	βc	ft (MPa)	fc (MPa)	fcb (MPa)	|σha| (MPa)	f1 (MPa)	f2 (MPa)	TCF
۰/۱۵	۰/۷۵	۰/۲۷	۲/۷۳	۳/۲۷۶	٤/۷۳	۳/۹۶	٤/۷۱	۰/۶

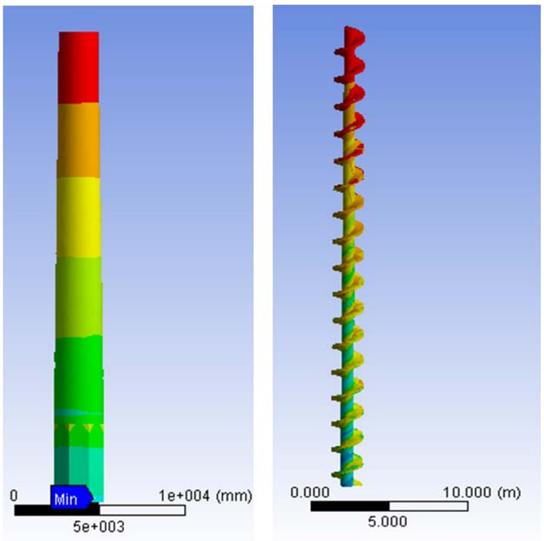
بررسی رفتار منارها تحت اثر بار ثقلی

با انجام آنالیز استاتیکی، تنش‌ها در سازه تحت اثر وزن سازه محاسبه شده است. همان‌گونه که پیش‌بینی می‌شود، تنش‌های ایجاد شده تحت بار وزن کمتر از مقاومت مصالح می‌باشند. برای نمونه توزیع تنش محوری در پوسته خارجی و پلکان مارپیچ منار چهل‌دختران در شکل (٤) نشان داده شده است.

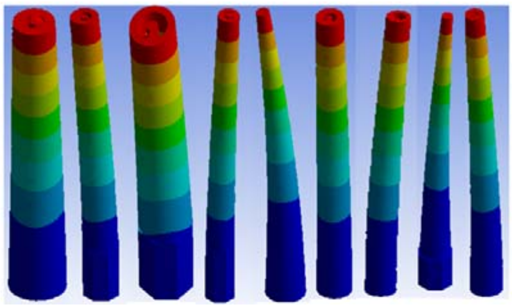
محاسبه مشخصات دینامیکی منارها

در آنالیز مودال، خصوصیات دینامیکی یک سازه نظیر فرکانس‌های تحریک، مقادیر میرایی و اشکال تغییرشکل یافته‌ی سازه که به آن شکل‌های مودی گفته می‌شود، استخراج می‌گردد. نتایج مربوط به فرکانس‌های ناشی از ٦ مود اول هر یک از منارها برای مقایسه در جدول (۳) و تغییرشکل منارها در مود اول در شکل (۵) آورده شده است. با توجه به نتایج این آنالیز می‌توان نتیجه گرفت که در همه‌ی موارد، فرکانس منار کامل کمتر از فرکانس پوسته‌ی منار و یا حداکثر با آن برابر است. در منار کامل وجود ستون و راه‌پله‌ها باعث افزایش جرم و کاهش فرکانس منارها می‌شود. لازم به ذکر است به‌علت انجام آنالیز تاریخچه زمانی غیرخطی، برای میرایی هر منار از میرایی رایلی

استفاده شده است. در آنالیز منارها، ضرایب میرایی رایلی از روی فرکانس‌های اولین و دومین مود ارتعاشی منارها و نسبت میرایی بحرانی ٥٪ محاسبه گردیده است.



شکل ٤ توزیع تنش در منار چهل‌دختران تحت بار وزن



شکل ٥ تغییرشکل منارها در مود اول (به‌صورت کامل): به‌ترتیب از چپ به راست: منار برسیان؛ منار چهل‌دختران؛ منار گار؛ منار سین؛ منار علی؛ منار ساربان؛ منار زیار؛ منار رهروان؛ منار باغ‌قوشخانه

جدول ٣ نتایج مربوط به فرکانس‌های (Hz) ناشی از ٦ مود اول منارهای موردمطالعه

	برسیان	چهل دختران	گار	سین	علی	زیار	رهروان	باغ قوشخانه	ساربان
مود ١	١/٠٩	٠/٧٩	٢/٣٤	٠/٥٥	٠/٧٨	٠/٥٨	٠/٧٣	٠/٤٢	٠/٤٨
مود ٢	١/٠٩	٠/٧٩	٢/٦٥	٠/٥٥	٠/٧٨	٠/٥٨	٠/٧٣	٠/٤٢	٠/٤٨
مود ٣	٥/١٦	٤/١٤	٥/٣٧	٢/٨٠	٢/٦٤	٢/٠٠	٣/٩٦	٢/٢٣	٢/٢٥
مود ٤	٥/١٦	٤/١٤	١١/٩٠	٢/٨١	٢/٦٤	٢/٠٠	٣/٩٦	٢/٢٣	٢/٢٥
مود ٥	٨/٠٦	٩/٠٩	١١/٨٧	٧/١٨	٥/٩٠	٤/٥٣	٨/٥٦	٥/٨١	٥/٥٠
مود ٦	١١/٠٧	١٠/٤٧	١٥/٥١	٧/١٨	٥/٩٠	٤/٥٣	١٠/٠٣	٥/٨١	٥/٤٥

انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها برای انجام آنالیز دینامیکی

با توجه به مبنا قرار دادن استاندارد ۲۸۰۰ [12] به‌منظور انجام آنالیز تاریخچه زمانی، می بایست شتاب‌نگاشت تا حد امکان نمایانگر حرکت واقعی زمین در محل احداث بنا در هنگام زلزله باشد. بدین منظور باید حداقل سه و یا هفت زوج شتاب‌نگاشت با ویژگی‌های عنوان شده در استاندارد ۲۸۰۰ در آنالیز مورد استفاده قرار گیرد.

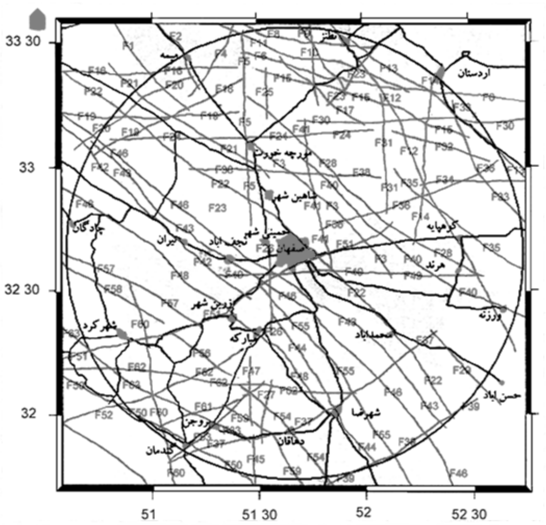
منارهای مورد مطالعه در محدوده‌ی استان اصفهان واقع شده‌اند. ماکزیمم شتاب زمین با احتمال رویداد ٪۱۰ در ٥٠ سال در شهر اصفهان از ۰/۱۸g تا ۰/۳۲g متغیر می باشد، که این مقدار در استاندارد ۲۸۰۰ ایران برابر ۰/۲٥g تعیین شده است. هم‌چنین زمین منطقه‌ی مورد مطالعه طبق استاندارد ۲۸۰۰ از نوع ۲ و ۳ می‌باشد، که در جهت اطمینان نوع ۳ در نظر گرفته شده است [13].

با توجه به این‌که اطلاعات شتاب‌نگاشت‌های مربوط به زلزله‌های رخ‌داده در منطقه‌ی مورد مطالعه در دسترس نیست، زلزله‌های واقعی اتفاق افتاده در مناطق دیگر که با شرایط تکتونیکی و لرزه‌ای اصفهان مطابقت دارند مورد استفاده قرار می‌گیرند. بدین منظور از اطلاعات لرزه‌ای جمع‌آوری شده توسط دانشگاه برکلی استفاده شده است [14].

با توجه به گسل‌های شناخته شده تا شعاع ۱۰۰ کیلومتری اصفهان (شکل ٦)، اطلاعات مذکور مربوط به هفت زلزله با بزرگای بین ٤ تا ٦/٥ ریشتر و تا شعاع ۱۰۰km، و دارای سرعت برشی خاک بین ۱۸۰m/s تا ۳٦۰m/s (USGS-C) (زمین نوع ۳) می‌باشد. ماکزیمم شتاب زمین در شتاب‌نگاشت‌های انتخاب‌شده بین g ۰/۱۸ تا g ۰/۳۲ می‌باشد. مشخصات این هفت زلزله در جدول (٤) ارائه شده است.

به‌منظور مقیاس کردن شتاب‌نگاشت‌ها براساس استاندارد ۲۸۰۰، ۷ زوج شتاب‌نگاشت معرفی شده در جدول (٤) به مقدار حداکثر خود مقیاس شده است.

طیف پاسخ شتاب هر یک از زوج شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده با منظور کردن نسبت میرایی ٪٥ تعیین می‌گردد و طیف پاسخ شتاب هر یک از زوج شتاب‌نگاشت‌های مقیاس‌شده با منظور کردن نسبت میرایی ٪٥ تعیین می‌گردد و طیف‌های پاسخ هر زوج شتاب‌نگاشت با استفاده از روش جذر مجموع مربعات با یکدیگر ترکیب می‌شود و یک طیف ترکیبی واحد برای هر زوج ساخته می‌شود.



شکل ٦ تعداد ٦۳ گسل شناخته شده تا شعاع ۱۰۰ کیلومتری اصفهان [۱٥]

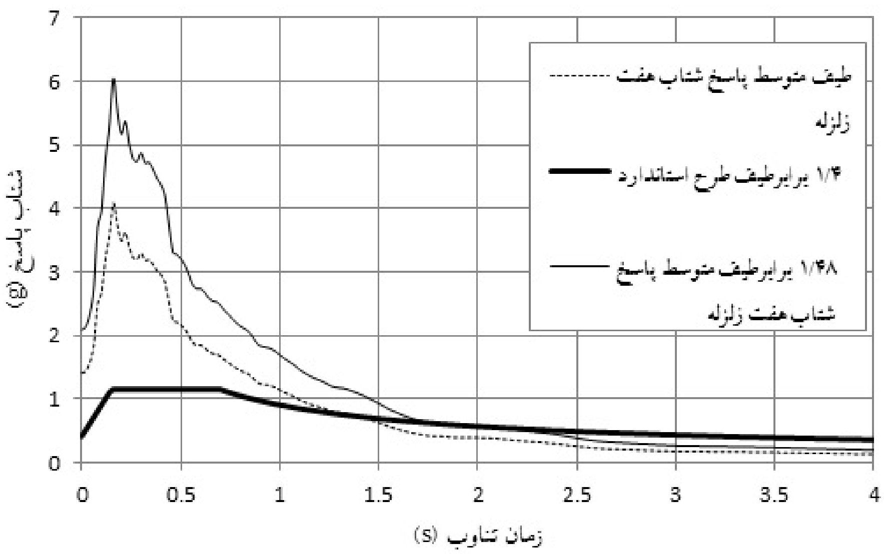
جدول ٤ مشخصات زلزله‌های انتخاب شده

شماره	نام زلزله	تاریخ	بزرگا (M)	ماکزیمم شتاب زمین (g)
۱	دریاچه کُیوته	۱۹۷۹	٥/۷	۰/۲٤۸
۲	مورگان هیل	۱۹۸٤	٦/۲	۰/۲۱۲
۳	نورت‌ریج	۱۹۹٤	٦/۷	۰/۲٤٥
٤	پارک فیلد	۱۹٦٦	٦/۱	۰/۲٤٦
٥	سان‌فرناندو	۱۹۷۱	٦/٦	۰/۲۱
٦	سوپرستیشن هیل	۱۹۸۷	٦/۷	۰/۲٤۷
۷	ویتر نروز	۱۹۸۷	٦	۰/۲٤۳

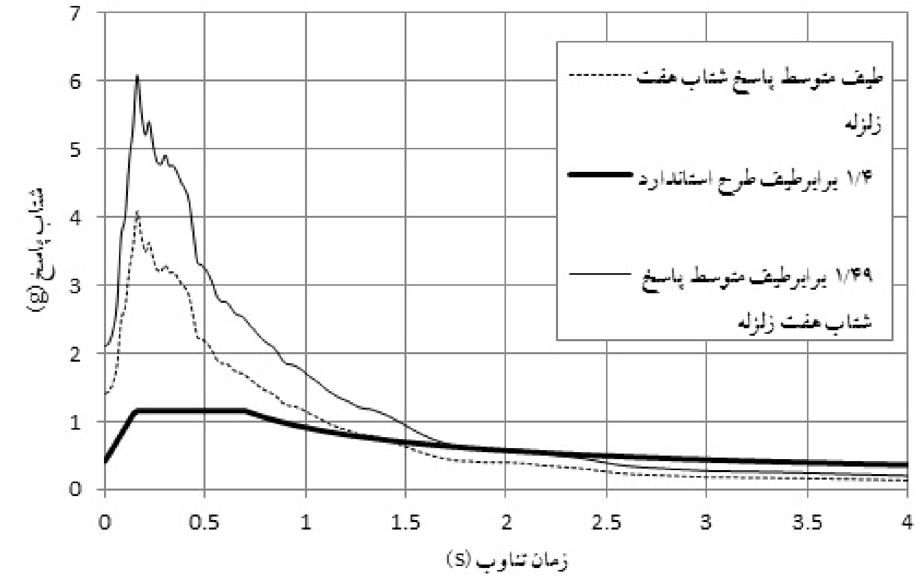
در ادامه طیف پاسخ ترکیبی هفت زوج شتاب‌نگاشت، متوسط‌گیری شده و در محدوده‌ی زمان‌های تناوب ۰/۲T و ۱/۵T با طیف طرح استاندارد که از حاصل ضرب مقادیر ضریب بازتاب ساختمان برای زمین نوع ۳ در پارامترهای نسبت شتاب مبنا (A=۰/۲۵ پهنه با خطر نسبی متوسط (اصفهان)) و ضریب اهمیت ساختمان (I=۱/۲ ساختمان‌های با اهمیت زیاد، ساختمان‌هایی که خرابی آنها سبب از دست رفتن ثروت ملی می‌گردد) با فرض نسبت میرایی ٪۵ به‌دست می‌آید مقایسه گردیده و ضریب مقیاس آن‌چنان تعیین شده که در این محدوده مقادیر متوسط‌ها در هیچ حالت کمتر از ۱/٤ برابر مقدار نظیر آن در طیف استاندارد نمی‌باشد. لازم به ذکر است که جهت نسبت دادن شتاب زلزله به سازه به می‌بایست ضریب AI نیز در شتاب ضرب شود. حال می‌توان این ضریب را بعد از مقیاس کردن و یا قبل از مقیاس کردن در طیف اعمال کرد. به‌عنوان نمونه طیف متوسط پاسخ شتاب هفت زلزله با ضریب مقیاس و بدون ضریب مقیاس برای منار رهروان در دو حالت کامل و فقط پوسته در شکل‌های (۷) و (۸) ترسیم شده است. ضریب مقیاس تعیین شده، در شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده (به مقدار حداکثر خود) ضرب شده و در تحلیل دینامیکی مورد استفاده قرار گرفته است.

نتایج آنالیز تاریخچه زمانی غیرخطی

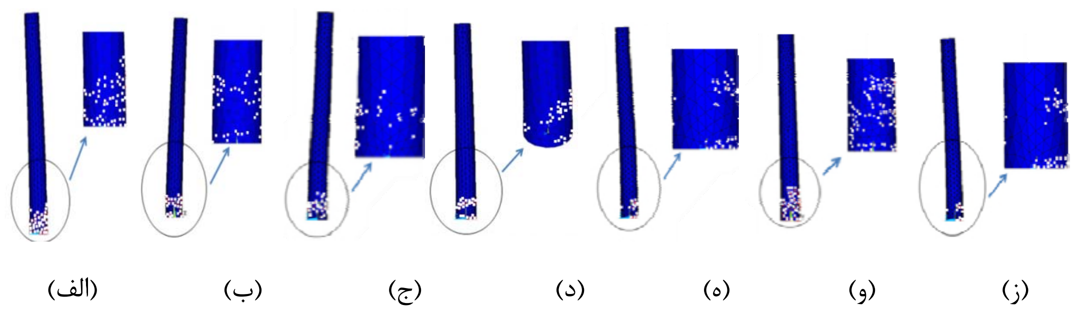
نتایج مربوط به منار رهروان و منار چهل‌دختران تحت اثر هفت زلزله در شکل های (۹) تا (۱۲) و جدول‌های (٦) و (۷) و نتایج مربوط به سایر منارها تحت زلزله‌ی ویتر نروز در جدول (۵) نشان داده شده‌اند. نتایج حاصل از آنالیز تاریخچه زمانی غیرخطی دلالت بر این دارند که همه‌ی منارها، هم به‌صورت کامل و هم فقط پوسته، در مراحل ابتدایی دچار شکست شده‌اند. تجمع ترک‌های ایجادشده در قسمت اتصال راه‌پله به ستون مرکزی و پوسته‌ی خارجی می‌باشد که در این محل تنش‌های کششی و فشاری به بیشترین مقدار خود در منار می‌رسد.



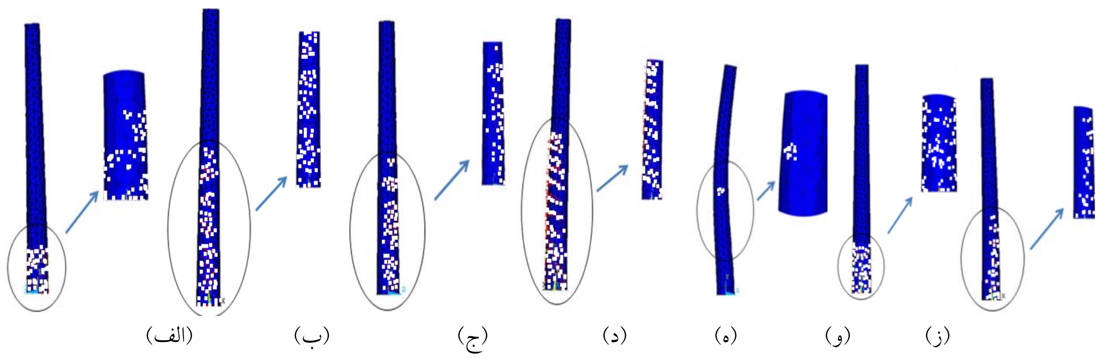
شکل ۷ مقایسه‌ی طیف متوسط پاسخ شتاب هفت زلزله با ۱/٤ برابر طیف طرح استاندارد، در محدوده زمان تناوب 0/2T و ۱/۵T (۰/۲۷ s و ۲/۰٦ s) برای منار رهروان (به‌صورت کامل)



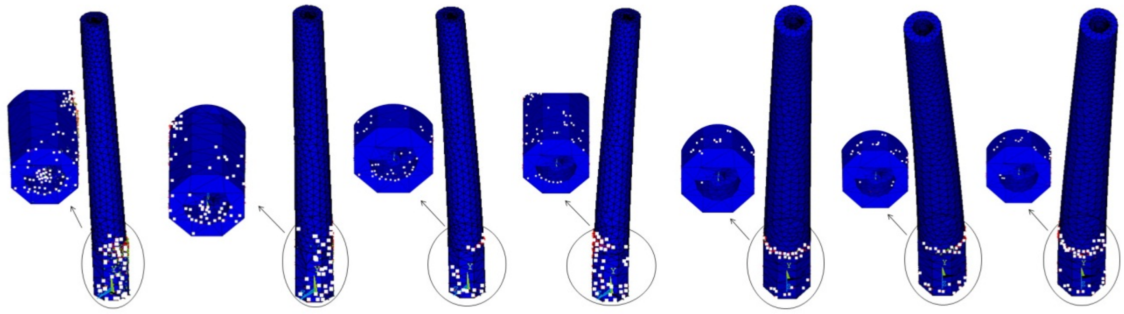
شکل ۸ مقایسه‌ی طیف متوسط پاسخ شتاب هفت زلزله با ۱/٤ برابر طیف طرح استاندارد، در محدوده‌ی زمان تناوب 0/2T و ۱/٥T (s ۰/۲٤ و s ۱/۸۳) برای منار رهروان (فقط پوسته)



شکل ۹ ترک‌های ایجاد شده در منار رهروان (به‌صورت کامل) در مرحله‌ی شکست تحت زلزله‌های: الف) ویتر نروز؛ ب) دریاچه‌ی کُیوته؛ ج) مورگان هیل؛ د) نورت‌ریج؛ ه) پارک فیلد؛ و) سان‌فرناندو؛ ز) سوپرستیشن هیل

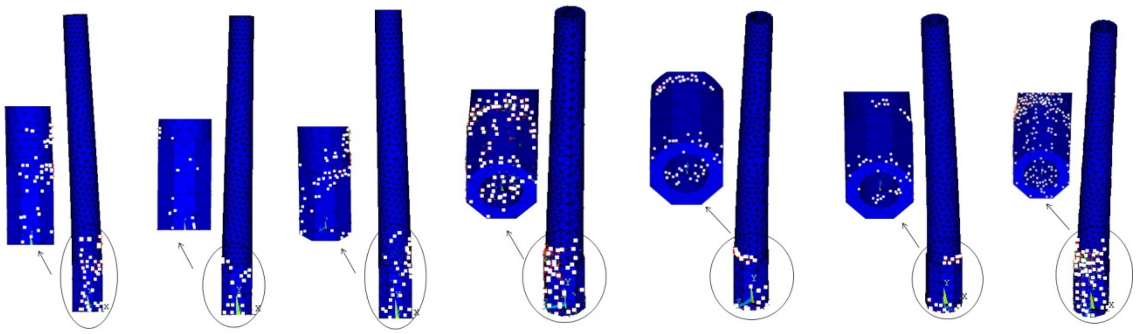


شکل ۱۰ ترک‌های ایجاد شده در منار رهروان (فقط پوسته) در مرحله شکست تحت زلزله‌های: الف) ویتر نروز؛ ب) دریاچه‌ی کُیوته؛ ج) مورگان هیل؛ د) نورت‌ریج؛ ه) پارک فیلد؛ و) سان‌فرناندو؛ ز) سوپرستیشن هیل



(الف) (ب) (ج) (د) (ه) (و) (ز)

شکل ۱۱ ترک‌های ایجادشده در منار چهل‌دختران (به‌صورت کامل) در مرحله‌ی شکست تحت زلزله‌های: الف) ویتر نروز؛ ب) دریاچه‌ی گُیوته؛ ج) مورگان هیل؛ د) نورت‌ریج؛ ه) پارک فیلد؛ و) سان‌فرناندو؛ ز) سوپرستیشن هیل



(الف) (ب) (ج) (د) (ه) (و) (ز)

شکل ۱۲ ترک‌های ایجاد شده در منار چهل‌دختران (فقط پوسته) در مرحله شکست تحت زلزله های: الف) ویتر نروز؛ ب) دریاچه گُیوته؛ ج) مورگان هیل؛ د) نورت‌ریج؛ ه) پارک فیلد؛ و) سان‌فرناندو؛ ز) سوپرستیشن هیل

جدول ۵ نتایج آنالیز تاریخچه زمانی غیرخطی منارها (به‌صورت کامل) تحت زلزله‌ی ویتر نروز در مرحله‌ی شکست

	زیار	علی	باغ قوشخانه	برسیان	گار	ساربان	سین
زمان (s)	١/١	١/١٨	٠/٧٦	٢/٥	٣/٩٦	٠/٧٦	٠/٨
تغییر مکان ماکزیمم (m)	٠/١٣٥٩	٠/١٠٨٤	٠/٠٧٤١	٠/٤٧١٧	٠/٣٢٢٣	٠/٢٩٥٤	٠/٠٩١١

جدول ٦ نتایج آنالیز تاریخچه زمانی غیر خطی منارهای رهروان و چهل‌دختران (فقط پوسته) تحت ۷ زلزله

		ویتر نروز	سوپرستیشن هیل	سان‌فرناندو	پارک فیلد	نورت‌ریج	مورگان هیل	دریاچه گُیوته
رهروان (پوسته)	زمان (s)	١/٠٦	١/٣٢	١/٤٣	١/٨٥	٦/٠٨	١/٧٧	١/٥
	تغییر مکان ماکزیمم (m)	٠/٠٦٥٩	٤/٤٨٨٠	٠/٠٥٣٦	٠/١٨٥٨	٠/٠٠٥٩	٠/٠٣٦١	٠/٠٣٥٣
چهل دختران (پوسته)	زمان (s)	١/٠٨	٤/٦٩	٠/٢٩	٠/٩٩	١/١٧	٠/٩٦٥	٠/٧٦٥
	تغییر مکان ماکزیمم (m)	٠/٠٩٨٠	٠/٠٢٨٠	٠/١٤٣١	٠/٢٦٢٢	٠/١٠١٣	٠/٠٨٥٠	٠/٩٢٩٧

جدول ۷ نتایج آنالیز تاریخچه زمانی غیرخطی منارهای رهروان و چهل‌دختران (به صورت کامل) تحت ۷ زلزله

		ویتر نروز	سوپرستیشن هیل	سان‌فرناندو	پارک فیلد	نورت‌ریج	مورگان هیل	دریاچه کُیوته
رهروان (کامل)	زمان (s)	۱/۰٦	۱/۹۷	۰/۲۸	۰/٦۳	۰/۷٦	۰/۵۵	۰/٦٤
	تغییر مکان ماکزیمم (m)	۰/۰۵۹	۰/۰٦۰۷	۰/۰٦۹۱	۰/۰۷٤۵	۰/۱۰۳۰	۰/۰٤۸۷	۰/۰٤۸۸
چهل دختران (کامل)	زمان (s)	۱/۰٦	۵/۳۳	۰/۲۹	۰/۹۹	۱/۱٦	۰/۹٦	۰/۷٦
	تغییر مکان ماکزیمم (m)	۰/۱۸۵۰	۰/۱٦۰۸	۰/۷۳۲۲	۰/۸٤٦٤	۰/۰۷٦۳	۰/۰۵۵٦	۰/۰۷۳٤

جدول ۸ تأثیر تغییر ارتفاع در رفتار دینامیکی منار رهروان تحت زلزله ویتر نروز

	۷ m پایین منار	۱۰ m پایین منار	۱۵ m پایین منار
وضعیت آسیب دیدگی	بدون شکست	شکست	شکست
زمان (s)	۲۸/٦	۳/۹٤	۳/۰٤
تغییر مکان ماکزیمم (m)	۰/۰۰۰۲	۰/۰۳۳۱	۰/۰٤۰۱

بررسی تأثیر ارتفاع و تغییر خصوصیات مکانیکی مصالح در رفتار منارها تحت بار زلزله

به‌منظور یافتن وضعیتی که منارها در اثر زلزله دچار شکست نشوند، تأثیر چهار پارامتر مختلف بررسی شده است. این پارامترها شامل ارتفاع منارها، مقاومت کششی و فشاری مصالح تشکیل‌دهنده‌ی منارها، معیار شکست و میزان میرایی می‌باشند.

در مورد تأثیر ارتفاع منارها لازم به ذکر است که در واقع عامل مؤثر بر زمان شکست منارها در آنالیز لرزه‌ای، نسبت ارتفاع به قاعده است. بدین منظور با ثابت در نظر گرفتن قطر منار، ارتفاع آن از بالا به‌تدریج کم (با حذف قسمت بالایی منار) و آنالیز انجام گرفته است.

این کار فقط برای بررسی تأثیر تغییر ارتفاع در قاعده‌ی ثابت صورت گرفته است و در عمل نمی‌توان از این روش برای بهبود رفتار سازه‌ای منار در مقابل زلزله استفاده نمود.

نتایج مربوط به منار رهروان در جدول (۸) آمده است.

می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش ارتفاع منار، زمان شکست به تأخیر می‌افتد، به‌طوری که با ارتفاع مشخصی منار دچار شکست نمی‌شود.

به‌منظور بررسی اثر تغییر مشخصات مکانیکی مصالح به‌کار رفته در منار، مقاومت‌های فشاری و کششی مصالح به‌ترتیب ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ برابر افزایش داده شدند. اگرچه این کار صرفاً به‌منظور بررسی پارامتری بوده است و در عمل امکان‌پذیر نمی‌باشد. نتایج برای منارهای رهروان و زیار در جدول (۹) نشان داده شده‌اند. حتی با افزایش ۵۰ برابری مقاومت مصالح، هنوز منارها دچار شکست می‌شوند. هنگامی که مقاومت‌های فشاری و کششی مصالح ۱۰۰ برابر می‌گردند، شکستی در منارها به وقوع نمی‌پیوندد. این بدین معنی است که افزایش خصوصیات مکانیکی مصالح در محدوده‌ای که معمولاً عملی می‌باشد، تأثیر تعیین‌کننده‌ای در بالابردن مقاومت کل سازه‌ی منار در مقابل زلزله ندارد.

جدول ۹ تأثیر افزایش مقاومت‌های کششی و فشاری برای منارهای رهروان، زیار و چهل‌دختران (به‌صورت کامل) تحت زلزله‌ی ویتر نروز

	منار چهل‌دختران		منار رهروان			منار زیار	
اندازه افزایش مقاومت های کششی و فشاری	۱۰۰ برابر	۵۰ برابر	۱۰۰ برابر	۵۰ برابر	۱۰ برابر	۱۰۰ برابر	۵۰ برابر
وضعیت آسیب دیدگی	بدون شکست	شکست	بدون شکست	شکست	شکست	بدون شکست	شکست
زمان (s)	۲۸/٦	٤/۱۲	۲۸/٦	۳/۹	۳/۰۲	۲۸/٦	۳/٤٦
تغییر مکان ماکزیمم (m)	۰/۰۰۰۲	۰/۱۷۵۲	۰/۰۰۰۳	۰/۳۸۱٦	۰/٤۷٦۵	۰/۰۰۳٤	۰/۱۲۳٤

جدول ۱۰ تأثیر استفاده از معیار شکست دراکر–پراگر برای منارهای رهروان، گار و زیار تحت زلزله‌ی ویتر نروز

	چهل دختران (کامل)	زیار (پوسته)	زیار (کامل)	رهروان (پوسته)	رهروان (کامل)
زمان (s)	۱/۰٦	۱/۱	۰/۸	۱/۱	۰/٦۲
تغییر مکان ماکزیمم (m)	۰/۰۵۸۷	۰/۱٦۲۱	۰/۱۳٤۵	۰/۰۸۰۱	۰/۰۰٦۰

با استفاده از معیار شکست دراکر–پراگر به‌جای معیار شکست ویلام–وارنک در آنالیزهای تعدادی از منارها، تأثیر تغییر معیار شکست در رفتار لرزه‌ای بررسی شده است. نتایج حاصل برای منارهای رهروان و زیار تحت زلزله‌ی ویتر نروز در جدول (۱۰) نشان داده شده‌اند. علی‌رغم تغییر معیار شکست، منارها هنوز در همان مراحل ابتدایی اعمال زلزله دچار شکست شده‌اند و در رفتار سازه‌ای آنها بهبودی مشاهده نمی‌گردد.

با توجه به آن که تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که در مواردی تغییر اندازه‌ی میرایی می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی در رفتار لرزه‌ای داشته باشد [14]، لذا به‌عنوان آخرین پارامتر مؤثر در رفتار منارهای تحت زلزله، اندازه‌ی میرایی از ٪۵ به ٪۲۰ افزایش داده شده است. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که منارهای مورد مطالعه مجدداً در همان مراحل اولیه‌ی اعمال زلزله دچار شکست می‌شوند و فقط میزان جابه‌جایی نهایی آنها در حالت میرایی ٪۲۰ در لحظه‌ی شکست کمتر از میزان جابه‌جایی در حالت میرایی ٪۵ می‌باشد.

بررسی نتایج آنالیز از جنبه‌ی کارایی آیین‌نامه‌های لرزه‌ای موجود

در حال حاضر در کشور آیین‌نامه‌ای برای بررسی رفتار سازه‌های تاریخی وجود ندارد، لذا در این مقاله با مبنا قرار دادن استاندارد ۲۸۰۰، شتاب‌نگاشت‌های ورودی برای انجام آنالیزهای تاریخچه‌زمانی انتخاب شده اند. اما نتایج آنالیز نشان می‌دهد که ضوابط آیین‌نامه‌های لرزه‌ای موجود، برای بررسی سازه‌هایی با قدمت تاریخی، بسیار سخت‌گیرانه می‌باشد و به مقاوم‌سازی نامناسبی می‌انجامد. دلیل این امر را می‌توان این گونه بیان نمود که علی‌رغم افزایش ۵۰ برابری مقاومت فشاری و کششی مصالح و یا کاهش ٪۵۰ ارتفاع منارها، این سازه‌ها همچنان جواب‌گوی ضوابط آیین‌نامه‌ها نمی‌باشند در صورتی که قدمت ساخت این آثار متجاوز از ۹۰۰ سال می‌باشد و در طی این سال‌ها همچنان پابرجا هستند. این نتایج مشابه نتایج گزارش‌شده از سایر محققان و در تکمیل مطالعات متعدد دیگری است که در زمینه‌ی بناهای بنایی (به جز منار) در سایر کشورها انجام گرفته است و تمامی تحقیقات منجر به نتایج مشابه شده است و به همین دلیل است که در دستورالعمل‌های یونسکو به همین نتیجه تأکید شده و نظر متخصصان به آن جلب شده است. البته همیشه استثنا نیز وجود دارد که البته نادر است. بر این اساس، آیین‌نامه‌ها و روش‌های عددی، اغلب مطابق با ساختمان‌های مدرن هستند و منجر به عدم توصیف دقیق رفتار واقعی سازه‌ی تاریخی و رفتار

مقاومتی بناهای تاریخی می‌شوند و سبب ارزیابی غیرواقعی ضریب اطمینان سازه می‌گردند[5, 7, 16]. لازم به ذکر است که حتی آیین‌نامه‌های معتبر نظیر Eurocode8 [17] و FEMA [18] در مورد ارزیابی لرزه‌ای و مقاوم‌سازی بناهای تاریخی مورد خاصی را مطرح نکرده‌اند. این آیین‌نامه‌ها فقط براساس پارامترهای کمی بنا شده‌اند در حالی که باید پارامترهای مهم کیفی نیز مورد توجه قرار گیرند. محدودیت‌ها و ضعف‌های آیین‌نامه‌ها و ضوابط قراردادی می‌تواند توسط پذیرش فعالیت‌های مکمل از قبیل بررسی تاریخی، بازدید و نظارت‌های فنی و آنالیز کیفی سازه‌ای برطرف شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش تعداد نه منار از مهم‌ترین منارهای قرن پنجم و ششم هجری قمری برای بررسی میزان آسیب‌پذیری در برابر نیروهای وزن و زلزله انتخاب شد. پس از معرفی مشخصات هندسی هر کدام از منارها به معرفی خصوصیات مکانیکی مصالح آجری به کار رفته در ساخت آنها و همچنین معیارهای شکست مناسب برای مدل‌سازی در نرم‌افزار ANSYS پرداخته شد. به‌منظور ارزیابی سازه‌ای منارها در برابر نیروی زلزله پس از انتخاب هفت شتاب‌نگاشت، متناسب با شرایط حرکت واقعی زمین در محل احداث منارها، و مقیاس کردن آنها با توجه به ضوابط استاندارد ۲۸۰۰، آنالیز تاریخچه‌زمانی غیرخطی بر روی منارها انجام شد که شامل نتایج زیر می‌باشد:

۱- تمامی منارها در لحظات ابتدایی زلزله و قبل از رسیدن به مقدار بیشینه‌ی شتاب‌نگاشت دچار شکست می‌شوند. در مواردی شکست پوسته‌ی منار نسبت به منار کامل در زمان دیرتری اتفاق افتاده است. دلیل این امر ضعف محل اتصال پلکان مارپیچ به پوسته و ستون مرکزی می‌باشد.

۲- ترک‌ها در حالت منار کامل نسبت به حالت فقط پوسته، در قسمت پایین‌تری رخ می‌دهند و عمدتاً در محدوده‌ی ۱۰٪ ارتفاع منار از قسمت پایین پراکنده شده‌اند که دلیل این امر ایجاد تمرکز تنش در پلکان مارپیچ و محل‌های اتصال آن به ستون مرکزی و پوسته می‌باشد.

۳- هر چه نسبت ارتفاع به قاعده‌ی منارها کمتر باشد، شکست دیرتر اتفاق می‌افتد. به‌طور مثال، منار گار که کمترین نسبت ارتفاع به قاعده (۳/۸۲) را در بین منارها دارد، دیرتر از بقیه‌ی منارها دچار شکست می‌شود.

٤- با کاهش ارتفاع منار، زمان شکست به تأخیر می‌افتد. به‌عنوان مثال با کاهش حدود ۳۳/۳۳٪ ارتفاع منار رهروان، ۲۹٪ به طول زمان شکست آن اضافه می‌گردد.

۵- افزایش مقاومت‌های فشاری و کششی مصالح حتی تا ۵۰ برابر (که البته در عمل امکان‌پذیر نمی‌باشد) نمی‌تواند باعث جلوگیری از شکست منارها در مقابل زلزله شود. تنها با افزایش ۱۰۰ برابری این مقادیر است که شکست رخ نمی‌دهد. البته با افزایش مقاومت مصالح، زمان شکست تا حدی به تأخیر می‌افتد.

٦- با تغییر معیار شکست ویلام-وارنک به دراکر-پراگر، منارها همچنان در همان مراحل ابتدایی شتاب‌نگاشت دچار شکست شده‌اند. جابه‌جایی‌های مرحله‌ی شکست در معیار شکست دراکر-پراگر در همه‌ی منارهای تحت بررسی نسبت به معیار شکست ویلام-وارنک کاهش یافته است. به‌عنوان مثال جابه‌جایی در مرحله‌ی شکست برای منار رهروان با استفاده از معیار شسکت دراکر-پراگر ٪ ۹۱/٥٤ نسبت به معیار شکست ویلام-وارنک کاهش داشته است.

۷- با تغییر میزان میرایی از ۵٪ به ۲۰٪ منارها مجدداً در همان مراحل قبلی دچار شکست می‌شوند و فقط میزان جابه‌جایی نهایی آنها بیشتر می‌شود. به‌عنوان مثال در منار رهروان (فقط پوسته‌ی خارجی) تحت

زلزله‌ی ویتر نروز، جابه‌جایی در حالت میرایی ۵٪، ۰/۰۶۵ m و در حالـــت میرایـــی ۲۰٪، ۰/۰۵۲ m (حدود ۰/۸ برابر حالت قبل) می‌باشد ولـی در هـر دو حالت زمان شکست در لحظه‌ی ۱/۰۶s می‌باشد.

مراجع

۱. مویدیان، س. م.، "آنالیز سازه ای منارهای تاریخی آجری ایران"، پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشگاه اصفهان، (۱۳۹۱).

2. Bernardeschi, K., Padovani, C. and Pasquinelli, G., "Numerical modelling of the structural behaviour of Buti’s bell tower", *Journal Cultural Heritage 5,* pp. 371-378, (2004).
3. Riva, P., Perotti, F., Guidoboni, E. and Boschi, E., "Seismic analysis of the Asinelli tower and earthquakes in Bologna", Soil Dyn. Earthquake Eng. 17, pp. 525-550, (1998).
4. Pena, F., Lourenço, P., "Numerical models for the seismic assessment of an old masonry tower Engineering Structures", Engineering Structures, pp. 1466-1478, (2010).
5. Hejazi, M., "Historical Buildings of Iran: their Architecture and Structure", Computational Mechanics Publications (WIT Press), Southampton and Boston, (1997).
6. "Basic Analysis Guide for ANSYS 14", SAS IP Inc., New York, (2011).
7. Hejazi, M. and Mehdizadeh Saradj, F., "Persian Architectural Heritage: Form, Structure and Conservation", WIT Press, Southampton and Boston, (2013).
8. Binda, L., Fontana, A. and Frigerio, G., "Mechanical behaviour of brick masonries derived from unit and mortar characteristics", *8th Int. Brick and Block Masonry Conf. Elsevier Applied Science,* London, pp. 205-216, (1988).
9. Korany, Y., "Mechanics and modeling of URM structures", *Proceedings of Int. Short Course on Architectural and Structural Design of Masonry*, Dresden University of Technology, Dresden, (2003).
10. Betti , M., Orlando, M. and Vignoli, A., "Static behaviour of an Italian medieval castle: damage assessment by numerical modelling", Computers and Structures, 89(21-22), pp. 1956-1970, (2011).
11. Pineda, P., Robador, M. and Gil-Marti, M., "Seismic damage propagation prediction in ancient masonry structures: an application in the non-linear range via numerical models", *The Open Construction and Building Technology Journal,* 5, pp. 71-79, (2011).
12. "Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings", (in Faris), Standard No. 2800, Building and Housing Research Centre, Tehran, (1988).
13. Khodadadi, A., "Seismic Hazard Analysis and Hazard Spectrum for Isfahan" (in Farsi), M.Sc. Thesis, Science and Research Branch Islamic Azad University, Isfahan, (2009).
14. Silva, W., "Strong Motion Database", California, http://peer.berkeley.edu/smcat/index.html, (2012).

۱۵. صفایی، ه.، "گزارش نهایی طرح تحقیقاتی شناسایی و بررسی توان لرزه‌ای گسل‌های اطراف اصفهان"، دانشگاه اصفهان، (۱۳۸۴).

16. EU-India Economic Cross Cultural Programme, "Guidelines for the Conservation of Historical

Masonry Structures in Seismic Areas", Rome, (2006).

17. Eurocode 8, "Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 3: Assessment and Retrofitting of Buildings", European Committee for Standardisation, Brussels, (2005).
18. FEMA-356, "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings", Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., (2001).